

중탄소강과 오스테나이트계 스테인레스강의 Nd:YAG 레이저의 이종금속 용접

신호준*(조선대 대학원 정밀기계공학과), 유영태(조선대 기전공학과), 안동규(조선대 기계공학과), 임기건(전남대 물리학과), 신병현(조선대 공과대학 기계공학과)

Dissimilar Metal Welding of Nd:YAG Laser of Austenitic Stainless Steel and Medium Carbon Steel

H. J. Shin(Precision Mechanical. Eng. Dept., CHU), Y. T. Yoo(Mechatronics. Eng. Dept., CHU), D. G. Ahn(Mech. Eng. Dept., CHU), K. Im(Physics Dept., CNU), B. H. Shin(Mech. Eng. Dept., An Engineering college of CHU)

ABSTRACT

Laser beam welding is increasingly being used in welding of structural steels. The laser welding process is one of the most advanced manufacturing technologies owing to its high speed and deep penetration. The thermal cycles associated with laser welding are generally much faster than those involved in conventional arc welding processes, leading to a rather small weld zone. Experiments are performed for 304 stainless steel plates changing several process parameters such as laser power, welding speed, shielding gas flow rate, presence of surface pollution, with fixed or variable gap and misalignment between the similar and dissimilar plates, etc. The following conclusions can be drawn that laser power and welding speed have a pronounced effect on size and shape of the fusion zone. Increase in welding speed resulted in an increase in weld depth/ aspect ratio and hence a decrease in the fusion zone size. The penetration depth increased with the increase in laser power .

Key Words : Laser welding(레이저용접), Butt welding(맞대기용접), Aspect ratio(용입비), STS304(오스테나이트계 스테인레스강), SM45C(중탄소강), 입열량(Heat input capacity)

1. 서론

산업화가 고도화되면서 소비자는 고기능성의 제품을 원하고 제조회사들은 소비자의 요구를 맞추기 위해서 다양한 가공방법과 기능이 다른 여러 종류의 재료로 제품을 생산하고자 한다. 특히 과거의 전통적인 용접으로는 만족할 수 없어 정밀한 금속접합은 레이저 용접으로 대체하고 있다. 재료를 고기능성으로 개선하기 위해 합금이 이용되고 더 나아가 신소재를 개발하거나 이종금속을 접합하여 그 기능을 보강하도록 하고 있다. 이에 따라 이종금속을 레이저로 용접함으로써 산업현장에서 요구하는 다양한 금속들의 접합에 대한 관심이 집중되고 있다.

그 예로 Mai¹⁾는 평균출력이 50W인 Nd:YAG

펄스 레이저로 두께가 1mm인 시편을 제작하여 강과 kovar 그리고 동과 알루미늄을 이종 용접하였다. Br? gemann²⁾는 St37-2강과 알루미늄합금(Al-Mg-Si0.7)를 출력이 5kW 인 CO₂ 레이저를 이용하여 이종용접을 이룬 및 결과와 비교하였다. 이³⁾는 TS304와 SM45C를 평균 출력이 500~600W인 Nd:YAG 펄스레이저로 0.5mm를 겹치기 용접을 하였다. 그러나 고출력의 CW Nd:YAG 레이저로 두께가 각각 3mm 이상 되는 STS304와 SM45C를 이종 용접한 연구 결과는 찾지 못했다.

레이저 용접은 고에너지 밀도 열원에 의해 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 종횡비(aspect ratio)가 대단히 크고, 용입 깊이가 깊고, 열영향부(heat affected zone:HAZ)가 작은

용접을 할 수 있다. 일반적으로 이종금속 용접은 용융용접을 주로 실시하고 있다. 그러나 용접 시 많은 문제점들이 있다. 이는 각각의 금속 화학성분의 차이에 따라 달라지는데, 용접 시 금속조직이 조대화하거나, 용융 온도와 응고 온도가 다르기 때문이다. 특히 원자구조가 달라서 용접 시 가장 먼저 생각해야 할 것은 물리적 화학적 성질이 거의 비슷한 성질을 가지고 있어야 한다. 그리고 이종 금속의 용접에서 문제점중의 하나는 두 금속간의 용접 차이이다. 일반적으로 용융용접에서 용접차가 큰 경우 용접부 균열이 발생하기 쉽다. 즉, 응고시에 용접차로 인한 응력이 발생하기 때문이다. 또한 계면에 취약한 생성상(phase)이 형성되거나, 두 금속의 희석에 의해 균열이 발생하여 양호한 성능을 얻을 수 없다.

그래서 레이저가 가지고 있는 장점을 이용하여 이종 용접의 문제점들을 극복하기 위해서, STS304와 SM45C를 이종 용접하였다. STS304는 고온산화성이 적고 뛰어난 내식성 때문에 부식 환경에 적응성이 우수한 특성이 있다. SM45C는 피로강도가 높고 열처리하면 마모에 강한 성질이 있어 내연기관이나 공작기계의 주요 부품으로 사용한다. 두 금속 최적의 용접조건을 결정하기 위해 비드 온 플레이트(bead on plate)를 실시하였다. 비드 온 플레이트 실험 결과로부터 용융 용접시 고온균열이나 기공 등 결함이 생기지 않는 조건을 찾고 있다. 레이저 용접 상태는 레이저빔의 파장, 레이저빔의 이송속도, 초점거리, 레이저빔의 출력, 보호가스 종류 및 유량, 재료의 레이저빔 흡수율과 반사율에 따라 다르다. 이와 같은 실험을 기초로 하여 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저(파장 1.06 μm)를 이용하여 STS304와 SM45C를 이종 용접하였다. 이종 용접한 후 용융비드 모양, 용접 단면의 미세조직을 관찰한 후 인장강도 실험하여 최적의 용접 공정변수를 제시하였다.

2. 실험

2.1 실험장비

본 연구에 이용한 Nd:YAG 레이저의 파장은 1.06 μm 이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파(continuous wave : CW)이고, 레이저 빔은 직경이 600 μm 인 광섬유를 통해서 전달한다. 빔

발산각은 25mrad이고, 광케이블에 연결되어 가공하는 공작대는 LASMA 1054이며, 작업대는 지면으로부터 진동을 방지하기 위해 화강암 정반으로 되어있다.

레이저 가공헤드는 겐트리 타입 Rotary축 가공장치로서 LASMA 1054 내부에 장착되어 있으며, x, y, z축의 이송거리는 1000? 00? 00mm이다. x축, y축에 대한 위치정밀도는 5 μm , z축에 대한 위치정밀도는 1 μm , 반복정밀도는 8 μm 이다. 레이저열처리용 가공헤드의 렌즈초점거리는 195mm에서, 초점크기(Spot size)는 최대 28mm크기의 타원형이고 Size는 1.6? .6"이다. 시편을 표면경화 시킬 때 표면과 대기중의 오염물질사이의 상호작용을 방지하기 위해서 질소가스를 45?각도 압력을 1 ~ 3bar 정도로 분사시킨다. 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도 및 레이저열처리 광학계의 개략도를 각각 Fig. 1과 같다.

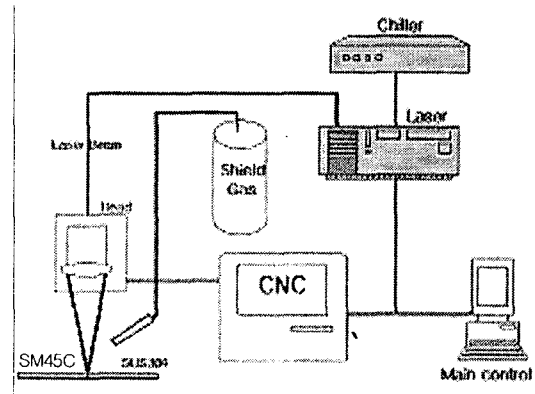


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

2.2 실험방법 및 시편

STS304와 SM45C를 Nd:YAG 레이저로 용접 시 보호가스는 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 이용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다. 아르곤 가스의 유량은 3~4 l/min로 하였다. 레이저 용접을 위한 레이저 빔 이송속도와 용접비드의 관계를 연구하기 위해 레이저 출력을 1600W로 고정하고 초점거리 z=0으로 하고 용접공정 변수를 연구했다. 이때의 용접속도를

Table. 1 Mechanical&Physical properties of STS304&SM45C

	Tensile stress (N/mm ²)	Elongation (%)	Thermal conductivity (W/mK)	Melting point(℃)	Density (Mg/m ³)	Thermal expansion	Hardness (H _B)
SM45C	48이상	-	36.5~43.5	1420~1450	-	10.73~10.92	220
STS304	612	40	14.9	1400	8	18.8	210

각각 0.8, 0.85, 0.9m/min로 변화시키면서 용접비드면

Table. 2 Chemical composition of STS304&SM45C

	C	Si	Mn	P	Ni	Cr
SM45C	0.42~ 0.48	0.15~ 0.35	0.6~ 0.9	0.03>	-	-
STS304	0.08	1.0	2.0	0.04>	8.0~10.5	18~20

과 비드폭을 측정하였다.

레이저 공정변수 변화에 따른 용접단면을 관찰하기 위해 정밀금속절단기로 용접시편을 절단하고 사포로 연마 및 폴리싱 후 CuSO_4 10mg + HCl 50ml + H_2O 50ml로 에칭하였다. 에칭된 용접비드 경계면은 광학현미경으로 관찰하였다. 레이저 빔을 금속 시편에 직접 조사하는(bead on plate) 방식과 맞대기 용접 후 용접단면을 절단하여 전자 현미경으로 용입깊이를 측정하였다. 용접시 용접속도의 변화에 따른 중횡비(aspect ratio)와 맞대기 용접시 최적의 용접조건을 찾기 위해 공정변수를 변화시키면서 레이저 용접 실험을 했다.

사용된 시편으로는 STS304와 SM45C이며 시편의 두께는 각각 3mm, 3.2mm이다. 용접시 시편 표면의 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시켜 가면서 실험하였다. 각 시편의 물리적·화학적 성분은 Table 1,2에 나타내었다.

시편은 공작대에 부착된 지그에 고정시키고 용접헤드에서 나오는 He-Ne 레이저광(적색)을 이용하여 용접위치를 확인하였다. 용접위치의 허용오차는 0.1mm 이하로 유지하였다. 시편을 지그로 단단히 고정시켜 용접 중 열팽창에 의한 변형이 발생하지 않도록 하였다. 이는 산업현장에서 용접 시 작업의 편의성 때문에 지그나 클램프 등으로 고정하는 것과 같은 현상을 유도하기 위함이기도 하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 STS304와 SM45C의 용접특성

이중용접에 앞서 STS304와 SM45C의 각각 최적의 용접조건을 결정하기 위해 예비실험을 하였다. 출력을 1.6kW로 하고 시편위에 초점면을 위치시켜 레이저빔의 속도 변화에 따른 용입 깊이의 변화를 bead on plate로 SM45C의 실험한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서는 레이저빔의 이송속도가 낮으면 입열량이 커서 용입깊이는 증가하지만 내부에 고온균열이 발생하는 현상이 Fig. 2에 나타나 있다. 그러나 레이저빔의 이송속도가 작으면 레이저 용접 단면 내부에 기공이 발생하였다. 이와 같이 기공은 레이저 용접 시 출력이 작았을 경우 모재가 열을 충분

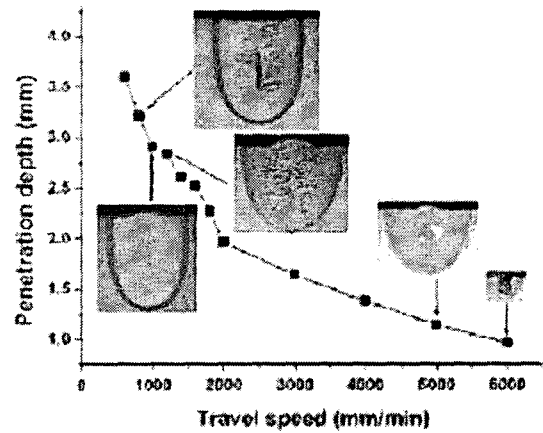


Fig. 2 Effect of travel speed on the weld

히 흡수하지 못하여 용융된 면적이 작고, 용융물의 유동성이 저하되어 용융 pool 내부에 발생한 기포가 확산되어 표면 위로 방출하지 못한 상태에서, 용융 표면이 급속히 응고되어 기포가 내부에 포획되어 발생한다. 고온균열은 입열량이 클 경우 레이저 용접시 용접 열에 의해 용융되었던 금속이 응고과정에서 SM45C의 조성에 포함되어 있는 P, S, C성분이 원인이다. 즉, P는 용점이 낮아 국부적으로 응고온도를 낮추어 고온균열 감수성을 증가시키고, S는 C와 비교해서 확산에 의한 이동속도가 늦어 응고 중에 편석이 심하게 일어나기 때문에 균열감수성을 증가시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해선 금속의 P, S, C를 없애거나 함유량을 낮추는 것이 최선의 방법이나 이는 경제적인 문제가 발생하므로 용접시 각종의 변수를 변화시킴으로써 고온균열이 발생하지 않는 최적의 공정변수를 찾아 해결하는 방법이 효과적인 방법이다.

레이저빔 용접속도가 증가하면 급속한 냉각효과를 나타내는 영역이 좁아져 초기균열 길이를 억제하는 효과가 있다. 따라서 용접속도가 5000mm/min이하에서는 용접속도가 빨라질수록 고온균열이 적게 나타나는 것으로 사료되는데 이는 통상의 아크용접과는 크게 다른 현상이다. 레이저출력이 1600W이고 레이저빔의 이송속도가 5000mm/min이상에서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 양호한 용접상태를 만들 수 없다. 레이저빔의 이송속도가 증가함에 따라 침투깊이가 감소하는 경향은 용접속도가 증가함에 따라 시편에 전달되는 입열량이 감소하기 때문이다. 또한 6000 mm/min이상에서는 입열량이 적고 냉각속도가 빨라서 기공이 발생한다.

SM45C의 용접특성과 STS304의 용접특성을 비교하기 위해 출력을 2KW 초점면의 위치는 시편표면보다 0.5mm 아래인 $z=-0.5\text{mm}$ 로 하여 레이저빔의 이송속도 변화에 따른 비드 단면의 변화를 bead on plate로

실험하여 Fig3에 나타내었다. 이때 사용한 보호가스는 Ar이고 유량은 4 ℓ/min으로 일정하게 유지하였다. 이송 속도가 낮으면 시편 표면의 용융부위가 커지기 때문에 종횡비는 오히려 레이저빔의 이송속도가 4m/min 일 때 보다 작았다. 빔의 이송속도가 커지

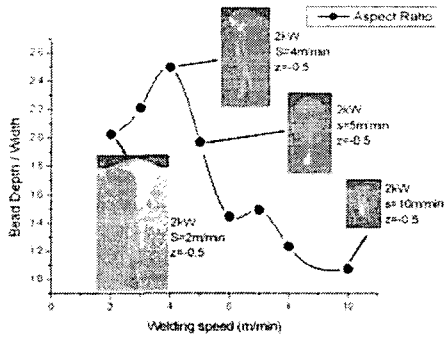


Fig.3 The aspect ratio on the Welding speed per unit time(m/min) Power=2kW; z=-0.5Ar=4 ℓ/min

면 표면에서 키 홀이 잘 형성되지 않아 레이저빔이 용융 풀에서 다중 반사될 확률이 줄어들어 흡수 에너지양이 줄어들기 때문이다. 용접공정 변수를 Fig. 3의 결과를 근거로 판단하면 STS304의 경우 출력 2000W에서는 빔 이송속도를 1m/min으로 했을 경우 초점거리 z=-0.5mm에서 두께 4mm까지는 용접이 가능함을 알 수 있다. SM45C의 실험결과를 나타낸 Fig 2와 비교해서 큰 특징은 용접단면 전체가 내부결함이 없이 양호한 상태를 나타내고 있다.

Fig 4는 레이저 출력과 초점거리를 P=1.6KW, Z=0으로 고정하고 레이저 빔 이송속도를 변화시켰을 때 용입폭과 용입깊이를 관찰하기 위해 비드형상

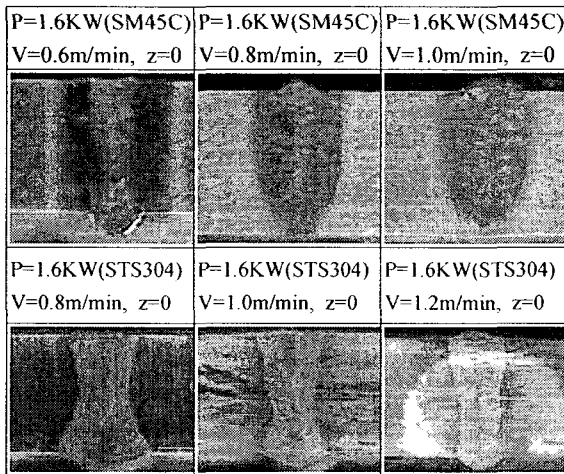


Fig 4. Welding Cross-section according to the laser travel speed.

을 관찰하였다. Fig 4를 보면 SM45C는 0.6m/min에서는 용융부가 시편을 관통하여 백비드가 생겼다. 0.8m/min에서는 용융부가 시편끝까지 잘 생성되었고 1.0m/min에서는 시편을 완전히 용융하지를 못한 것을 알 수 있다. 또한 STS304는 용융부가 전체적으로 잘 생성이 되었지만 이송속도가 증가할수록 용융폭(W)이 감소하여 종횡비가 증가하고 있다.

3.2 입열량

레이저 빔의 출력과 이송 속도 변화에 따른 SM45C와 STS304의 입열량 변화를 비교하기 위해 식 (1)로 계산하여 각각 Fig5와 Fig6에 나타내었다.

$$E = \frac{P}{W \cdot v} \quad (1)$$

여기서, E는 입열량 (J/cm²), P는 출력(W), W는 용접면의 비드폭(cm), v는 레이저빔의 이송속도 (m/s)이다. Fig. 5는 레이저 빔 이송속도가 증가할수록 입열량이 감소한다. 특히 1.0m/min 이상에서는 급격히 감소하고 있다. 이는 키홀을 형성하지 못하여 입열량이 감소한 것으로 보이며 0.8m/min 근처에

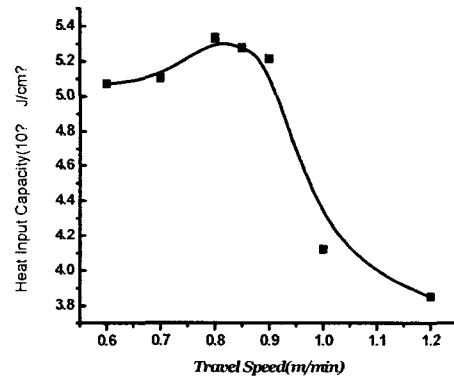


FIG 5. Effect of laser travel speed on the heat input capacity(SM45C)

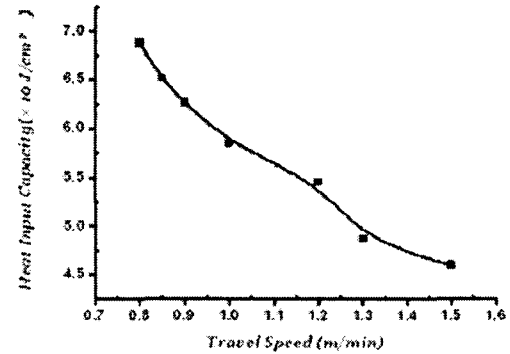


Fig 6. Effect of laser travel speed on the heat input capacity (STS304)

서 가장 큰 입열량 값을 얻을 수 있다.

STS304는 Fig 6에서 보는 바와같이 이송속도가 증가함에 따라 입열량이 변화하다가 1.2m/min 이상에서는 급격히 감소함을 보여준다. 그리고 1.0m/min에서 가장 큰 입열량이 얻어 짐을 알 수 있다.

SM45C의 경우 레이저빔을 시편표면에 조사 하였을 때 STS304보다 표면에 흡수하여 전달되는 열량이 많아 용접폭이 상대적으로 크다. 그러나 STS304는 레이저빔이 표면에 조사 되었을 때 주위로 열을 빠르게 전달하기 때문에 용접폭은 작고 용입깊이가 큰 용접 결과를 나타내고 있다. STS304의 경우 레이저빔의 이송속도를 0.8m/min 이하로 하였을 경우 시편에 입사되는 레이저빔의 출력이 과다하여 3mm시편을 사용할 수 없었다. 그래서 레이저 용접할 때 내부 결합등 용접성이 양호하지 않은 SM45C에서 입열량이 가장 크게 나타나는 용접 공정변수에서 이중 용접하였다. 이중 용접이 가능한 용접 공정 조건을 결정하기 위해 레이저빔의 출력은 1.6KW, 초점거리는 시편표면(Z=0)으로 하고, 보호가스는 Ar으로 4ℓ/min일 때 레이저빔 이송속도의 변화에 대한 입열량의 변화를 Fig 5와 6에 나타냈다. Fig 5와 6의 실험결과에 의하면 레이저빔의 이송속도가 0.8m/min 일 때 입열량이 SM45C의 경우 5.275? 0.00cm²/초이고 TS304는 6.5? 0.00cm²/초이었다 레이저빔의 이송 속도는 0.9m/min 일 때의 SM45C의 입열량은 5.213? 0.00cm²/초이고 STS304는 6.27? 0.00cm²/초이었다

3.3 이중 용접 단면

STS304와 SM45C를 위에서 설명한 용접 공정변수에서 레이저 빔의 이송속도를 0.8m/min, 0.85m/min, 0.9m/min로 이중 용접하였다. 이중 용접한 용접 단면을 Fig 7에 나타내었다. SM45C와 STS304를 이중 용접했을 경우 탄소강인 SM45C의 탄소성분이 탄화되어 부족한 성분을 STS304성분이 유동하면서 재응고된 형태를 나타내고 있다. 레이저빔의 이송속도가 0.9m/min일때는 레이저빔의 이송속도가 빠르기 때문에 입열량이 상대적으로 작아 관통 용접이 되질 않았다. 관통 용접이 되지 않으면서 용접내부의 심각한 교반작용으로 시편 중심부 용융단면이 항아리 모양을 하고 있다. 레이저빔이 빠르게 진행하면서 시편의 윗면과 아래 부분은 빠르게 재응고하고 냉각이 양쪽 기지 조직으로부터 진행되어 시편 내부중아부에 고온균열이 발생하였다.

Fig 2, Fig 3, Fig 4에 나타낸 것처럼 SM45C는 레이저빔이 시편에 조사되면 열전도에 의해 용접입구 단면적이 STS304보다 크다. 이와 같은 이유로 이중 용접의 경우에도 SM45C 방향으로 용융풀이 유동하면서 재응고 되었음을 나타내고 있다. 양쪽 모재에서 응고하기 시작하여 용융풀 중심 방향으로 응고하

기 때문에 용융풀 중심부는 액체 상태로 있지만 모재부분부터 냉각에 의한 재응고 때문에 중심부에 균열이 발생하였다.

고온 균열에 영향을 미치는 금속학적 인자로는 응고초기의 상(Phase), 응고모드(Solidification mode), 입계편석물 및 저융점 개재물, 용접비드의 응고 형태를 들 수 있다. 이중에서도 주된 발생 원인을 강중에 함유되어 있는 P,S,C 등의 불순물의 편석에 따라 형성되는 저융점 개재물로서, 이들의 최종 응고부의 입계에 존재함으로써 입계를 저온까지 취약하게 만든다. 따라서 고온균열은 통상 입계 조직에 따라 진전된다. 응고 이동 결정입계(Solidification migrated grain boundary)는 용접 금속이 응고할 때 생긴 수지상들이 마주쳐서 생긴 응고 결정립계이다. 응고 후 냉각 도중에 입계의 계면에너지를 최소화하기 위해 이동되며 직선화된 결정립계를 응고 이동 결정입계라고 하는데, 이때 용접부의 응고 이동 결정입계에서 지그등의 고정장치에 의해 발생하는 외부 구속력에 의한 구속도가 클수록 이동 결정립계에서 응고 균열이 발생한다. 그러므로 SM45C와 STS304를 이중용접을 할 경우에는 레이저빔이 이동하면서 시편의 응고 속도가 용접단면에서 균일화도록 레이저빔의 이송속도를 결정하여 용접중심선에 수직으로 냉각이 급속하게 되지 않도록 해야 한다.

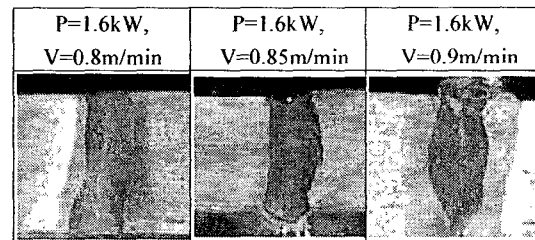


Fig 7. Dissimilar Metal Welding according of travel speed.

4. 결론

일반기계구조용 탄소강인 SM45C와 오스테나이트계304 스테인레스강을 Nd:YAG 레이저 빔으로 이중용접한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SM45C의 경우 고온균열은 입열량이 클 경우 레이저 용접시 용접 열에 의해 용융되었던 금속이 응고과정에서 SM45C의 조성분에 포함되어 있는 P, S, C성분이 원인이 된다.

(2) SM45C는 빔 이송속도가 1.0m/min 이상에서는 급격히 감소하고 기홀을 형성하지 못하여 입열량이 감소한 것으로 보인다. 이와 반대로 STS304는 빔 이송속도가 증가하면서 입열량이 선형적으로 감

소하였다.

(3) 이중용접한 후 양쪽 모재에서 응고하기 시작하여 용융풀 중심 방향으로 응고하기 때문에 용융풀 중심부는 액체 상태로 있지만 모재부분 부터 냉각에 의한 재응고 때문에 중심부에 균열이 발생하였다.

후기

본 연구는 지역협력연구센터지원사업인 조선대학교 LRRRC(레이저응용 신기술연구센터)에서 지원하
는 연구비에 의한 것입니다.

참고문헌

1. T.A.Mai, A.C.Spowage, "Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminum," *Materials Science and Engineering Vol 374* pp. 224-234, 2004.
2. G. Br? gemann, A.Mahrle, Th.Benziger, "Comparison of experimental determined and numerical simulated temperature fields for quality assurance at laser beam welding of steels and aluminum alloyings," *ND&E International Vol 33* pp. 453-463, 2000
3. 이철규, 강창규, 스테인레스강과 탄소강의 Nd:YAG 레이저 용접특성에 대한 연구, 대한 용접학회 춘계 학술발표대회 발표, 2004
4. Z.Sun, "Feasibility of producing ferritic/ austenitic dissimilar metal joints by high energy density laser beam process," *ELSEVIER, Vol. 68*, pp. 153-160, 1996.
5. J.N.DUPONT, S.W.BANOVIC and A.R.MARD., "Microstructural Evolution and Weldability of Dissimilar Welds between a Super Austenitic Stainless and Nickel-Based Alloys," *WELDING JOURNAL*, pp. 125-135, 2003.
6. Richard E. Avery, "Pay attention to dissimilar-metal welds Guidelines for welding dissimilar metals," *Chemical Engineering Progress*, pp. 1-7, 1991.
7. Young-Tae Yoo, Yong-seok Oh, Kwan-Bo and Kiegon Im, "Comparison of welding Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel and SM45C Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser," *KSMTE, Vol. 12, No. 3*, pp. 58-67, 2003.
8. F.M.HOSKING, J.J.STEPHENS and J.A.REJENT, "Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals," *WELDING JOURNAL*. pp. 127-136, 1999.
9. Z.Sun and R.Karppi, "The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, pp. 257-267, 1996.
10. Lief Karlsson, "WELDING OF DISSIMILAR METALS," Pergamon, pp. 125, 1995.
11. A. A. OMAR, "Effects of Welding Parameters on Hard Zone Formation at Dissimilar Metal Welds," *WELDING JOURNAL*, pp. 86 - 93, 1998.
12. M.G.COLLING, J.C.LIPPOLD, "Investigation of Ductility Dip Cracking in Nickel-Based Filler Materials - Part I(II)," *WELDING JOURNAL*, pp. 288-295, 2003.
13. J.N.DUPONT, "Microstructural Development and Solidification Cracking Susceptibility of a Stabilized Stainless Steel," *WELDING JOURNAL*, pp. 253-263, 1999.
14. V.R.DAVE, M.J.COLA and M.KUMAR, "Grain Boundary Character in Alloy 690 and Ductility-Dip Cracking Susceptibility," *WELDING JOURNAL*, pp. 1-5, 2004.
15. M.QIAN, J.C.LIPPOLD, "Liquation Phenomena in the Simulated Heat-Affected Zone of Alloy 718 after Multiple Postweld Heat Treatment Cycles," *WELDING JOURNAL*, pp. 145-150, 2003.
16. M.Y.LI, E.KANNATEY-ASIBU and JR, "Monte Carlo Simulation of Heat-Affected Zone Microstructure in Laser-Beam-Welded Nickel Sheet," *WELDING JOURNAL*, pp. 37-44, 2002.
17. C.S.KUSKO, J.N.DUPONT and A.R.MARDER, "The Influence of Microstructure on Fatigue Crack Propagation Behavior of Stainless Steel Welds," *WELDING JOURNAL* pp. 6-15, 2004.
18. G.CAM, S.ERIM and C.YENI, "Determination of Mechanical and Fracture Properties of Laser Beam Welded Steel Joints," *WELDING JOURNAL* ,pp. 193-201, 1999.
19. M.QIAN, J.C.LIPPOLD, "The effect of Multiple postweld heat treatment cycles on the weldability of Waspaloy," *WELDING JOURNAL*, pp. 233- 238, 2002.
20. Z.Sun, "Feasibility of producing ferritic/ austenitic dissimilar metal joints by high energy density laser beam process," *ELSEVIER, Vol. 68*, pp. 153-160, 1996.
21. X.W.Wu, R.S.Chandel and H.P.Seow, H.Li, "Wide gap brazing of stainless steel to nickel-based superalloy," *Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 215-221, 2001,